

## コンクリート構造物における光ファイバによる計測技術の開発

## Development of Measurement Technology Using Optical Fiber in Concrete Structure

小林 聖 取 達 剛 藤 岡 彩永佳 中 嶋 翔 平  
水 野 健 柳 井 修 司 山 野 泰 明<sup>1)</sup>

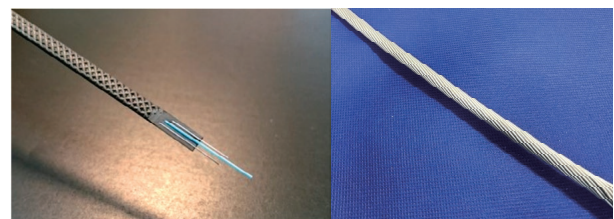
## 要 約

光ファイバにより、コンクリート打込み時の充填挙動のモニタリング、コンクリートの温度・ひずみ計測に加え、温度応力によるひび割れ検知への適用を検討した。その結果、充填不良などコンクリートの充填挙動を精度よくリアルタイムでモニタリングすることができた。また、実構造物においてコンクリートの硬化過程における温度・ひずみを計測できることを確認するとともに、ひずみの計測結果より、躯体全域においてひび割れ発生の予兆、および発生時期と位置を検知することができた。さらに、ひび割れが部材中心でま

ず発生し、数日後にひび割れがかぶりに延伸する傾向を初めて「見える化」することができた。

## 目 次

- I. はじめに
- II. 光ファイバによるコンクリートの充填挙動モニタリング
- III. 光ファイバ計測技術の温度ひび割れ検知への適用
- IV. 光ファイバを活用したコンクリートの合理的なひび割れ制御の方向性
- V. おわりに



ひずみ計測用 温度計測用  
Photo 1 光ファイバケーブルの概要  
(Optical Fiber)

## I. はじめに

分布型光ファイバセンシング技術は、光ファイバにより線状にひずみ・温度の分布を計測することが可能であるが、従来型の計測技術では精度や速度が不十分であり適用が広がっていなかった。そこで、著者らは2年前から従来よりも圧倒的に高精度で高速な計測が可能であるレイラー散乱光<sup>1)</sup>を利用した計測技術の開発に着手し、様々な工種への適用について検討を行っている。計測に使用している光ファイバをPhoto 1に示す。基本的に光ファイバは、温度測定用のケーブルとひずみ測定用のケーブルに分かれており、計測したい項目により設置するケーブルを選択している。

コンクリート分野においては、コンクリートの充填挙動のモニタリングへの適用とコンクリートの温度・ひずみ計測への適用を検討している。コンクリートの充填挙動のモニタリングについては、トンネルの覆工コンクリートを想定した検証を行った。覆工コンクリートのように、狭隘部におけるコ

ンクリートの打込みは比較的スランプの大きいコンクリートを吹上げ工法や片押し工法によって施工するのが一般的である。このような施工において、コンクリート打込み後の背面側(地山側)の充填状況は目視で確認することができず、充填検知センサやRI試験機による充填検知方法<sup>2)</sup>が用いられてきた。しかし、これらの測定器の多くは設置した点での局所的な充填状況しか検知できない技術である。また、硬化後に背面空洞を検知する電磁波レーダ技術<sup>3)</sup>もあるが、現状では施工時におけるリアルタイムな管理には適用できない。これらの課題に対し、ひずみの変化を線かつリアルタイムに捉えることのできる光ファイバを用いることでコンクリートの充填挙動をモニタリングできるのではないかと考えた。

一方、土木構造物はマスコンクリートであり、コンクリート内部の温度が高温になることから温度ひび割れの発生が懸念される。ひび割れにより様々な劣化因子の侵入が容易と

1) 東北支店 Tohoku Branch

キーワード：光ファイバ，充填検知，温度計測，ひずみ計測，ひび割れ検知

Keywords : optical fiber, filling detection, temperature measurement, strain measurement, crack detection

なるため、耐久性の観点からひび割れの防止・抑制が重要である。このひび割れを防止・抑制するために、施工前に温度応力解析を行い、必要に応じて様々な対策を講じている。しかし、実際の施工条件は事前解析の前提条件とは異なることなどもあり、ひび割れが発生してしまう場合もある。

発生したひび割れの検証のために、躯体内部に設置された温度計やひずみ計による計測データを入力値として事後の温度応力解析を実施することがある。しかし、それらは躯体内部の点のデータであり、そのデータのみで解析結果をフィッティングさせたとしても、材料としてのコンクリートのばらつきや予測しがたい外気温の推移の影響がある中で、外気温の影響度合いも異なるマスコンクリート部材全体を精度よく解析できているとは言い難い。

光ファイバはケーブルそのものがセンサであり、コンクリート中に敷設すれば躯体全体の温度とひずみを 5 秒毎に 20mm ピッチで線状に計測することができる性能を持っている。低コストかつ容易に、ばらつきも含めた躯体全体の状態をリアルタイムで把握できる。このデータを事後の温度応力解析に利用することで解析精度の向上も図ることができる。さらに、ひずみの局所的な増大を捉えることでひび割れの検知も可能となると考えられる。

本報では、光ファイバによるコンクリートの充填挙動の把握、硬化過程のコンクリートに生じる温度・ひずみの計測およびひび割れ検知について、実際の構造物を用いて計測を試みたので、それらの結果について以下に詳細を報告する。

## II. 光ファイバによるコンクリートの充填挙動モニタリング

### 1. 試験体概要

光ファイバによるコンクリートの充填挙動のモニタリングについて検討した。本検討で用いた試験体の概要を Fig.1 に示す。試験体は、トンネル内空の天端アーチ部を模擬した既設構造体（以後、模擬構造体と称す）と、セントルを模擬した鋼製型枠から成る。使用したコンクリートの材料を Table 1 に、配合を Table 2 に示す。覆工厚を 0.4m とし、図に示す打設口 1 箇所からの片押しでコンクリートを打ち込んだ。締固めは、1.5m おきに中央部、両肩部の 3 箇所にした。硬化後に充填状況が確認できるように、模擬構造体と覆工コンクリート部分の境界面には縁切りシートを設置し、硬化後に覆工コンクリート部分のみを引き出せるようにした。

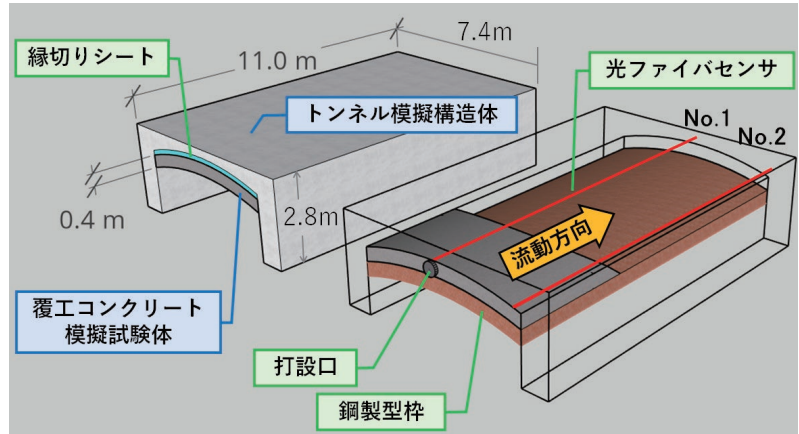


Fig.1 試験体の概要 (Specimen Overview)

Table 1 使用材料 (Material)

材料	記号	摘要
水	W	地下水
セメント	BB	高炉セメント B 種, 密度 3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 3.10
	S2	山砂, 表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 1.70
粗骨材	G	碎石, 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> , 実積率 59.0%
混和剤	Ad	AE 減水剤 (標準形 1 種)

Table 2 配合 (Mix Proportion)

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
					W	BB	S1	S2	G	Ad
20	57.5	15	4.5	48.8	171	298	571	307	931	2.98

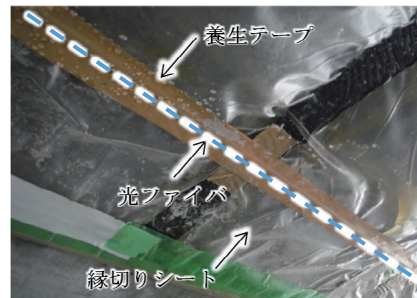


Photo 2 光ファイバの設置方法 (Optical Fiber Installation Method)

### 2. 計測方法

光ファイバの設置位置は Fig.1 に示すように、コンクリートの流動方向と平行に 2 測線 (No.1: 中央部, No.2: 肩部) とした。光ファイバはひずみ計測用のものを用いた。光ファイバの設置方法を Photo 2 に示す。模擬構造体の内面に養生テープを用いて固定した。計測はレイリー散乱光を用いて行い、5 秒間隔で 2 測線分を同時に計測した。

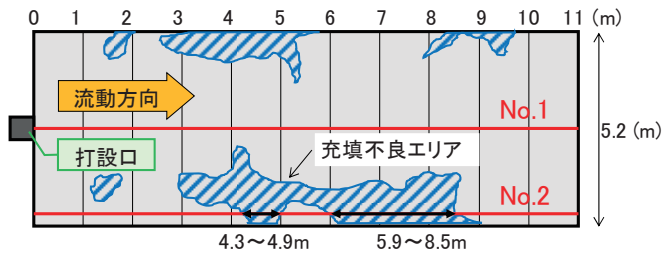


Fig.2 コンクリートの充填状況のスケッチ  
(Sketch of Concrete Filling Situation)

### 3. 計測結果

硬化後に覆工コンクリートを引き出し、目視により充填状況を確認した。充填状況のスケッチを Fig.2 に示す。図中の斜線部は充填不良の部分である。No.1 の測線上には充填不良の箇所がなく、No.2 の測線上では打設口側の棲を起点として 4.3m~4.9m、5.9m~8.5m 付近の位置に充填不良が生じていたことを確認した。

No.1 測線の光ファイバによるひずみの測定結果について、打込み開始から 0, 30, 60, 90 分後の結果と目視によるコンクリートの充填範囲を Fig.3 に、No.2 測線の測定結果を Fig.4 に示す。No.1 については、時間が経過し、打込みが進むにつれてひずみの発生範囲がコンクリートの流動方向に広がっていることが確認できた。その速度は概ね打込み速度と一致しており、光ファイバは温度変化や物理作用によって生じるひずみを検知することができることから、今回の測定結果はコンクリートの充填挙動を検知したものと考えられる。また、全ての範囲においてひずみが計測されており、充填不良箇所が無いという目視による結果と一致した。

一方、No.2 については、打込みとともにひずみの発生範囲がコンクリートの流動方向に広がっているものの、打込みを終えてもひずみをほとんど検知しないエリアを確認することができた。目視による結果と比較すると、充填不良のエリアと光ファイバがひずみを検知しないエリアが一致しており、光ファイバによって充填不良の検知が可能であることが明らかとなった。

## Ⅲ. 光ファイバ計測技術の温度ひび割れ検知への適用

### 1. 構造物の概要

光ファイバによるコンクリートの温度・ひずみ計測に加え、ひび割れ検知への適用を検討した。本検討の対象構造物を Fig.5 に示す。外径 18m、全高 46.5m、壁厚 1.5m の構造目地のない円形ケーソンで、リフト高さ 5.3m を 9 リフトで施工するものである。ケーソンに使用したコンクリートの使用材料を Table 3 に、配合を Table 4 に示す。本構造物は事前の温度応力解析によりひび割れ指数が 1.0 を下回ることが確認されており、ひび割れの発生は許容するものの、配力筋を増やすことでひび割れ幅を抑制する対策を講じた。

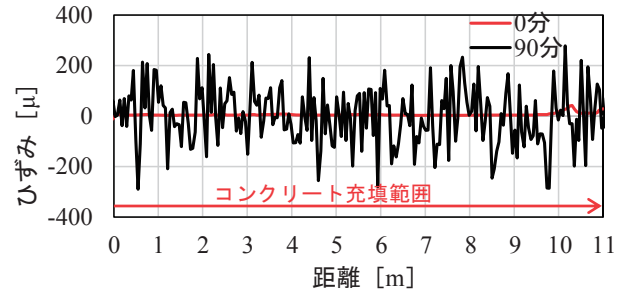
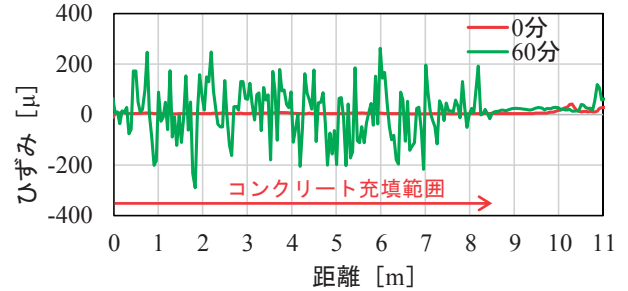
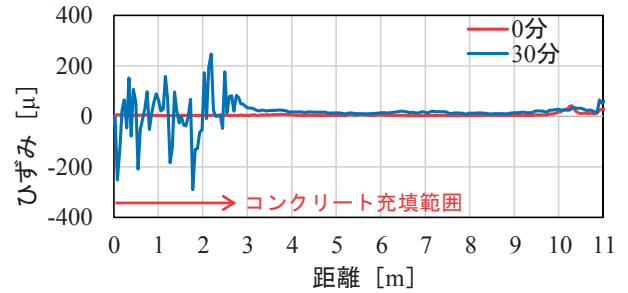


Fig.3 No.1 における光ファイバによるひずみの測定結果  
(Measurement Result of Strain by Optical Fiber in No.1)

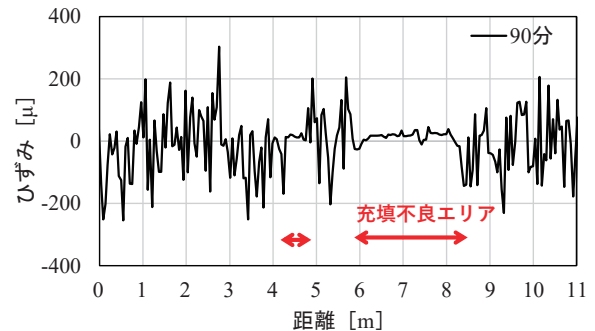


Fig.4 No.2 における光ファイバによるひずみの測定結果  
(Measurement Result of Strain by Optical Fiber in No.2)

### 2. 計測方法

計測対象リフトは第 3 リフトとし、約 1 カ月前に施工された第 2 リフトの拘束により鉛直方向の温度ひび割れが懸念された。そこで、Fig.6 に設置位置を示すように、温度およびひずみ計測用の光ファイバを円周方向に部材中心とかぶり部の 2 側線にそれぞれ設置した。光ファイバ計測の空間分解能は 50mm、計測間隔は 20 分とした。また、Fig.6 に示すように比較として熱電対と埋込み型ひずみ計を部材中心に

設置した。打込み後、材齢 5 日で型枠を取り外してビニールシートによる封緘養生を行った。

### 3. 計測結果

光ファイバによるコンクリート温度の計測結果を Fig.7 に示す。なお、計測結果は Fig.6 の温度計位置のものを示す。温度は材齢 1 日でピークに達し、その後は緩やかに低下した。図中には熱電対の計測結果を併記しているが、光ファイバの計測結果は熱電対と同等であった。なお、温度低下時に若干乖離することが確認されており、この現象は今後の検討課題とする。コンクリートのひずみの計測結果を Fig.8 に示す。計測結果は Fig.6 のひずみ計と同じ位置のものを示し、プラス側が収縮、マイナス側が膨張である。コンクリートの終結時間を初期値としているが、コンクリートは材齢 1 日まで 100 $\mu$  程度膨張し、その後は温度低下に伴い収縮した。図中にはひずみ計の計測結果を併記しているが、光ファイバの計測結果はひずみ計と同等であった。ただし、光ファイバでは温度の計測結果をもとにひずみを算出しているため、温度の乖離現象の影響を受けてひずみも若干の乖離することが確認された。

部材中心とかぶり部の周方向に一周配置した光ファイバによるひずみ分布の計測結果を Fig.9 に示す。横軸は基点からの距離とし、ここでは全長の 1/4 の計測結果を示した。縦軸は計測したひずみを表しており、プラス側が膨張、マイナス側が収縮である。全体的な傾向としては、コンクリートの収縮に伴い光ファイバも収縮方向のひずみが生じている。一方で、材齢 5 日において基点から 5, 15, 23m 付近の部材中心のひずみの計測結果が膨張側に大きく変化している。このことから、部材中心ではこれらの箇所においてひび割れが生じていた可能性がある。一方、かぶり部の光ファイバではその現象を確認できていないため、この時点ではひび割れが発生していたとしても部材内部にとどまり、躯体表面に達していないものと考えられる。材齢 7 日において、部材中心の計測結果でひずみのピークと同じ箇所にかぶり部にもひずみのピークが確認され、この時点でひび割れが貫通したものと考えられる。また、躯体表面を対象とした目視によるひび割れ調査により、光ファイバにて得られたひずみのピーク位置とひび割れ発生位置が合致していることが確認された。さらに、ひび割れの発生時期について事前の温度応力解析では材齢 7 日からひび割れ指数 1.0 を下回る結果となっており、解

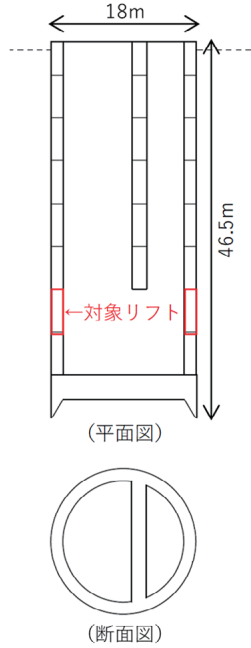


Fig.5 構造物の概略 (Outline of Structure)

Table 3 使用材料 (Material)

材料	記号	摘要
水	W	地下水
セメント	H	早強ポルトランドセメント, 密度 3.14g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	砂, 表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 2.80
粗骨材	G	碎石, 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> , 実積率 59.0%
混和剤	Ad	AE 減水剤 (標準形 1 種)

Table 4 コンクリートの配合 (Mix Proportion)

W/C (%)	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	H	S	G	Ad
54.5	12.0	4.5	170	312	859	946	4.37

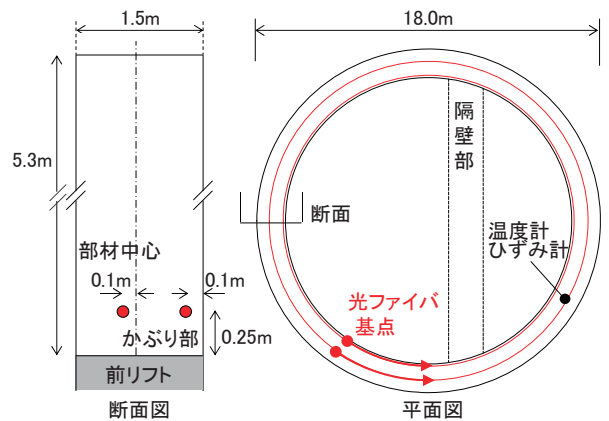


Fig.6 光ファイバ設置位置 (Installation Position of Optical Fiber)

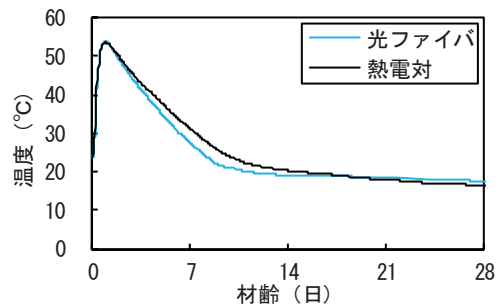


Fig.7 温度測定結果 (Result of Temperature Measurement)

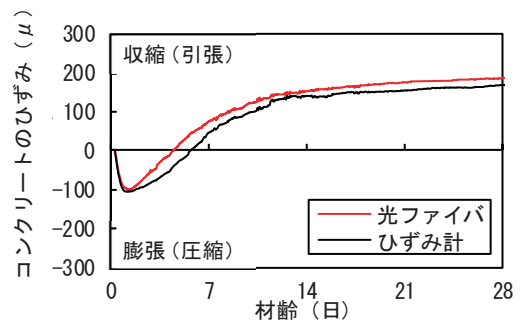


Fig.8 ひずみ測定結果 (Result of Strain Measurement)

析の結果とも整合が取れていた。以上より、光ファイバにより、構造物の全域にわたりひずみを計測することができ、そのひずみのピークによりひび割れの発生時期と位置を検知することが可能であることが示唆された。

ひずみのピークが発生している箇所における部材中心とかぶり部のひずみ履歴を Fig.10 に示す。部材中心でひずみが増大し、その数日後にかぶり部でひずみの増大が確認された。事前の温度応力解析においても、このことから、光ファイバを部材中心とかぶり部に設置して計測することで、これまで捉えることが出来なかった部材中心でひび割れが発生し、それがかぶり部に向かって延伸している状況が初めて「見える化」することができたものと考えられる。

#### IV. 光ファイバを活用したコンクリートの合理的なひび割れ制御の方向性

これまでにはひび割れ発生の検証や対策立案のために部材内部で 1, 2 点の温度データを用いて事後の温度応力解析を行うことがあった。しかし、コンクリート構造物は材料のばらつきに加え、環境条件の影響を受けるため、そのようなマスコンクリートの挙動を 1, 2 点の温度データだけで評価することは本来適切ではないと考えられる。ケーブル全体がセンサである光ファイバを敷設すれば、ばらつきも含めて構造物全体の温度・ひずみ挙動を把握することが可能となる。さらにひび割れの発生挙動も把握できることから、ひび割れの発生を考慮した解析技術の精度向上が可能となる。さらに、光ファイバの計測とその計測結果の解析へのフィードバックを継続することで、PDCA サイクルがスパイラルアップし、さらなる解析精度が期待でき、より合理的なコンクリート構造物のひび割れ防止および抑制対策が可能となると考える。

コンクリートに温度ひび割れを発生させないためには、コンクリート中の温度をコントロールし、温度ひび割れが発生しない応力（ひずみ）状態に維持することが重要である。このような「アクティブな」温度制御技術としてクール&ヒート工法<sup>4)</sup>がある。クール&ヒート工法は、躯体内に通水パイプを埋設して適切な時期に冷水または温水を流すことで、コンクリート躯体の温度変化を緩やかにして発生するひずみを低減し、コンクリートに発生する温度応力を緩和する技術である。Fig.11 に示すように、このクール&ヒート工法に光ファイバを組み

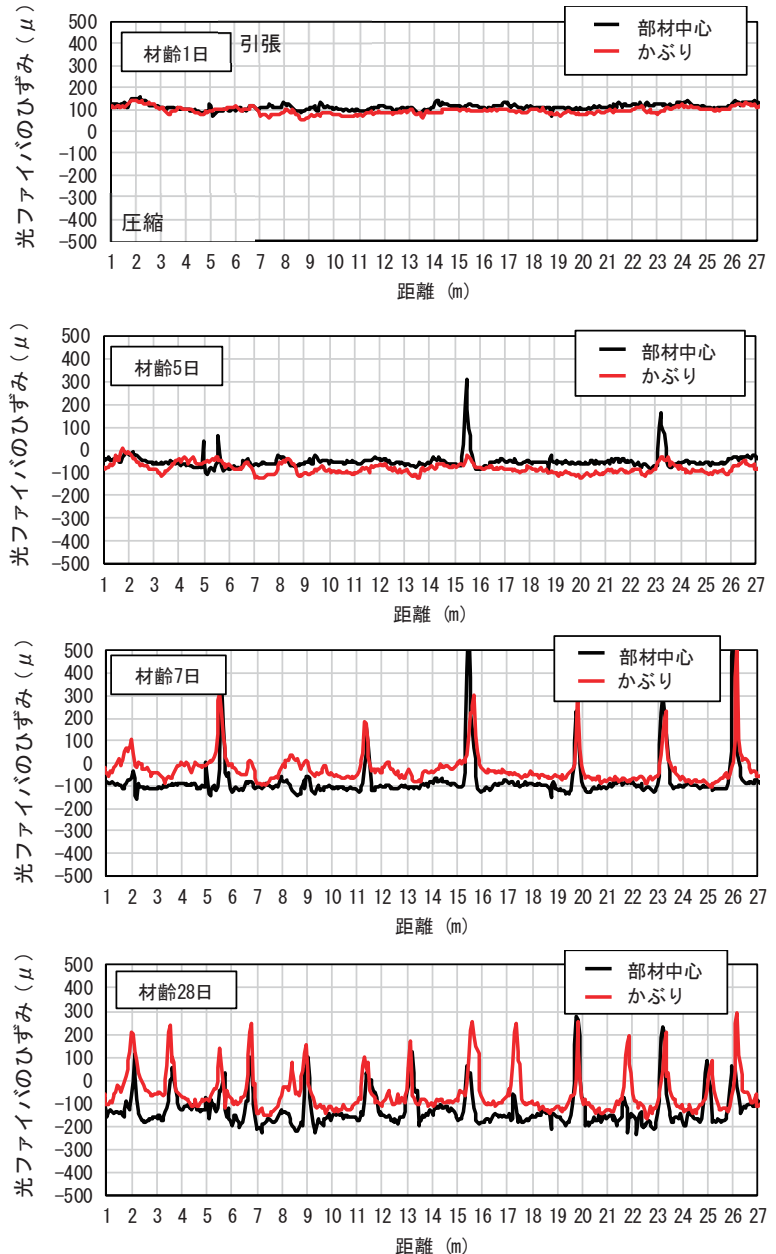


Fig.9 光ファイバによるひずみ分布の計測結果  
(Measurement Result of Strain Distribution by Optical Fiber)

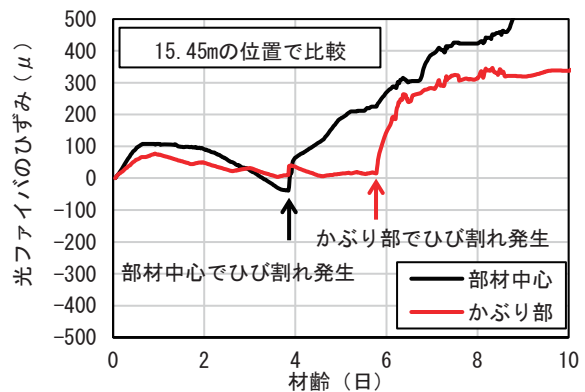


Fig.10 部材中心とかぶりのひずみ履歴  
(Strain History of Member Center and Cover Concrete)

合わせることで、部材全体の温度とひずみの状態をモニタリングしながら適切に温度をコントロールすることができる。

一方で、施工性あるいは経済性の観点から、ひび割れの発生を許容し、目標とするひび割れ幅以下となるように制御する場合も少なくない。一般に、ひび割れ幅の制御方法としてひび割れ制御鉄筋が追加で配置されるが、最も効果的な配置に関する十分な知見が無いため、現状では構造物の表層に近い位置に追加されている。しかし、理論的に部材中心からひび割れが進行するという事象を光ファイバにより明らかにできたことから、構造物の表層付近ではなく部材内部にひび割れ制御鉄筋を配置することで、ひび割れの進展を止めるという新しいひび割れ幅抑制対策の可能性が考えられる。以上のとおり、ひび割れ防止およびひび割れ幅抑制に関して、光ファイバによる計測と組み合わせることで、より合理的に対処できるようになる可能性があるものと考えられる。

## V. おわりに

トンネルの覆工コンクリートの施工時に光ファイバを設置することで、コンクリートの充填挙動を広範囲を連続的にモニタリングできる可能性が示唆された。また、躯体内の温度およびひずみの傾向を適確に捉えることができた。さらに、ひび割れの発生時期や位置およびひび割れの予兆を初めて「見える化」することができた。今後は測定精度の向上を図りつつ、光ファイバの測定を応用して、ひび割れの防止および合理的なひび割れ幅の抑制について検討を行う予定である。

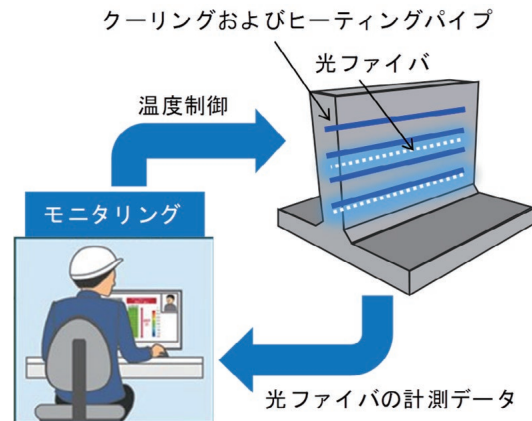


Fig.11 コンクリートの温度制御の一例  
(Example of Concrete Temperature Control)

## 参考文献

- 1) 岸田欣増ら：SMFにおけるひずみと温度が識別できるハイブリッド分布測定システムの開発，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.112，No.403，2013，pp.37-42.
- 2) 安藤慎一郎ら：トンネル覆工コンクリート充填検知手法へのRI水分計の適用性検討，土木学会年次学術講演会論文集，第65回，V-579，2010，pp.1157-1158.
- 3) 前原聡ら：トンネル覆工コンクリートの背面空洞充填工法の施工管理方法に関する検討，東急建設技術研究所報，No.44，2018，pp.15-18.
- 4) 青山達彦ほか：冷・温水を通水させる躯体の温度制御による温度ひび割れ抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，2017，pp.1345-1350.

## Development of Measurement Technology Using Optical Fiber in Concrete Structure

*Satoru Kobayashi, Takeshi Torichigai, Saeka Fujioka, Shohei Nakashima, Ken Mizuno, Shuji Yanai and Yasuaki Yamano<sup>1)</sup>*

In addition to monitoring filling behavior during concrete driving and measuring the temperature and strain of concrete using an optical fiber, we examined the application of optical fiber to crack detection. As a result, it was possible to monitor the filling behavior of concrete in real time as well as accurately detect filling defects. It was also possible to measure the temperature and strain during the hardening process of concrete in an actual structure. In addition, from the strain measurement results, the timing and position of cracks in the entire skeleton could be detected. Furthermore, it was possible for the first time to “visualize” the tendency of cracks to occur in the center of the member, and those cracks stretch from the center of the member to its surface after a few days.